

# Comparaison de méthodes de traitement d'antenne à directivité constante en champ proche

Régis PERRIER, Marie-Agnès PALLAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INRETS-LTE

25 av. F. Mitterrand, Case 24, F-69675 Bron cedex, France

perrier.regis@gmail.com, pallas@inrets.fr

**Résumé** — La localisation de sources par formation de voies (FV) présente des performances en matière de résolution spatiale qui varient avec la fréquence. Cette étude analyse trois méthodes de traitement d'antenne à directivité constante en bande large, dérivées de la FV, et adaptées à la localisation de sources sonores au passage de véhicules (champ proche, sources mobiles). Ces méthodes sont comparées sur la base de trois critères : largeur et uniformité du lobe en fréquence, niveau des lobes secondaires.

**Abstract** — As a mean for source localization, classical beamforming has a frequency dependent beamwidth. This paper compares three wideband beamforming methods, which maintain a constant beamwidth over a large frequency band, in the context of sound source localization at vehicle pass-by (nearfield and moving source). Three criterions are evaluated : sidelobe levels, consistency and width of the main lobe over the frequency band.

## 1 Introduction

Les nuisances sonores liées au transport, notamment celles qui affectent les riverains des voies de circulation, constituent une préoccupation essentielle, le plus souvent associée aux contextes urbain et périurbain. Le diagnostic ou la prévision d'un environnement sonore nécessite une connaissance de l'émission des véhicules, dans des conditions de circulation réelles. Dans certains cas une représentation simplifiée du véhicule par une source ponctuelle ou linéique peut être suffisante. Cependant une description plus fine, impliquant un ensemble de sources représentatives des différentes zones d'émission de bruit, s'impose lorsqu'il s'agit de réaliser un diagnostic précis du véhicule, d'analyser le comportement des sources en fonction des paramètres de fonctionnement, ou de développer un modèle d'émission plus adapté à une description dynamique d'un trafic. L'analyse de situations réelles, qu'il s'agisse de véhicules d'essai ou du trafic mesuré au passage, est une problématique de localisation de sources.

Le cadre de cette étude concerne la localisation horizontale de sources sonores sur des véhicules, routiers ou ferroviaires, en mouvement. Les mesures sont effectuées au moyen d'une antenne linéaire horizontale, en champ proche de façon à améliorer la résolution spatiale de l'antenne ; les ondes sonores ne sont plus planes et le déplacement du véhicule induit un effet doppler sur les signaux [7].

La formation de voie (FV) constitue la méthode de base en traitement d'antenne ; elle est adaptée dans son principe à la localisation de sources ponctuelles stationnaires. Considérée comme un filtre adapté spatial, elle permet, par recalage temporel et combinaison linéaire des signaux de ses capteurs, d'accéder au signal en provenance d'une source située dans une direction d'écoute  $\theta_0$ . Le signal de

sortie  $S(t, \theta_0)$  d'une antenne de  $(2N + 1)$  capteurs équidistants d'espacement  $d$ , et qui pointe dans la direction  $\theta_0$  (onde plane), peut se résumer à :

$$S(t, \theta_0) = \sum_{n=-N}^N w_n x_n(t + n \frac{d \sin \theta_0}{c}) \quad (1)$$

où  $x_n(t)$  représente le signal sur le capteur  $n$  et  $w_n$  les coefficients de pondération des capteurs de l'antenne. La géométrie de l'antenne ainsi que le choix des coefficients  $w_n$  conditionnent les performances spatiales du système (résolution spatiale, niveau des lobes secondaires). Les performances associées au traitement (1) dépendent de la fréquence : en particulier la résolution spatiale se dégrade progressivement vers les basses fréquences. Dans de nombreuses applications, les sources à analyser ont une étendue fréquentielle large.

Le filtre spatial (1) destiné à extraire le signal de son contexte ne présente pas des caractéristiques constantes sur tout le spectre du signal. Différentes techniques ont été proposées pour pallier ce problème ([1]-[6]). Nous considérons ici uniquement celles qui dérivent de la formation de voies standard. L'idée commune est de choisir des coefficients de pondération qui ne sont plus constants, s'exprimant par un filtre de réponse impulsionnelle  $w_n(t, \theta_0)$  :

$$s(t, \theta_0) = \sum_{n=-N}^N w_n(t, \theta_0) * x_n(t) \quad (2)$$

ou dans le domaine fréquentiel :

$$S(f, \theta_0) = \sum_{n=-N}^N W_n(f, \theta_0) \cdot X_n(f) \quad (3)$$

où  $W_n(f, \theta_0)$  et  $X_n(f)$  sont les transformées de Fourier respectives de  $w_n(t, \theta_0)$  et  $x_n(t)$  <sup>1</sup>. Les méthodes se dis-

<sup>1</sup>Pour la FV classique :  $W_n(f, \theta_0) = w_n \cdot e^{2j\pi f n d \sin \theta_0 / c}$

tinguent par la façon de calculer ces coefficients en relation avec la géométrie de l'antenne adoptée.

L'étude présentée dans cet article analyse trois traitements à directivité constante dérivant de la formation de voies standard, sur la base de simulations avec source mobile, en tenant compte des aspects pratiques et des performances de localisation. Chaque technique est considérée via trois critères : niveau des lobes secondaires de la réponse d'antenne, largeur et uniformité du lobe principal.

## 2 Méthodes de localisation à directivité constante

### 2.1 Antennes imbriquées

Dans cette méthode, le problème de directivité est traité de façon purement géométrique : l'antenne est constituée de plusieurs sous-antennes, identiques à un coefficient d'homothétie  $r$  près, chacune traitant indépendamment une bande de fréquence par la méthode de formation de voies classique (cf. (1)) : les espacements entre microphones ainsi que la longueur totale de l'antenne sont multipliés par  $r$  lorsqu'on passe d'une sous-antenne à la suivante. On choisit  $r$  de telle sorte que certains microphones soient communs à plusieurs sous-antennes, permettant de réduire le nombre de capteurs nécessaires. Il ne s'agit pas en soi d'une méthode à directivité constante; elle constitue ici notre référence associée au traitement par formation de voies classique. Dans le cas présent, on considère  $r = 2$ , chaque sous-antenne est spécifique à une bande d'octave.

### 2.2 Méthode multi-faisceaux

Elle a été proposée par Michael M. Goodwin en 1993 [5]. Sachant que le lobe d'écoute d'une antenne s'élargit en direction des basses fréquences, le principe consiste à sélectionner les performances de la fréquence la plus basse, et à dégrader celles des fréquences supérieures pour les rendre identiques à celle-ci. A cet effet, pour chaque fréquence, on préforme parallèlement l'antenne dans  $(2M + 1)$  directions adjacentes voisines de l'angle d'écoute  $\theta_0$ , puis on somme chaque réponse d'antenne pour recomposer un lobe élargi. Ces directions sont adaptées pour chaque fréquence :

$$W_n(f, \theta_0) = w_n \sum_{m=-M}^M e^{jng(f, \theta_0) \frac{m}{M}} \quad (4)$$

où  $g(f, \theta_0)$  est une fonction liée au choix des coefficients de pondération  $w_n$ . Les analyses indiquent qu'il est préférable de limiter ce principe à une octave. Mais l'utilisation conjointe du principe de l'antenne imbriquée (§2.1) permet d'élargir facilement la bande d'analyse.

Cette démarche choisit de privilégier une directivité constante au prix d'une dégradation de la résolution spatiale sur l'ensemble de la bande d'analyse.

### 2.3 Méthode CSA (*Combinaison des Sous-Antennes*)

Cette méthode propose de traiter une bande de fréquence de type  $[F, rF]$  (où  $r$  est un entier,  $r \in [2 : 4]$ ), par combinaison linéaire de deux sous-antennes suivant l'équation fréquentielle [1][2][3] :

$$S(f, \theta_0) = Z_1(f)S_1(f, \theta_0) + Z_2(f)S_2(f, \theta_0) \quad (5)$$

où  $Z_1(f)$  et  $Z_2(f)$  sont deux fonctions de pondération pour les sorties d'antennes  $S_1(f, \theta_0)$  et  $S_2(f, \theta_0)$ .  $S_1(f, \theta_0)$  et  $S_2(f, \theta_0)$  sont déduits de (3). Le critère de directivité constante est obtenu en contraignant le système à maintenir deux points fixes dans sa réponse spatiale à toutes les fréquences : la direction à -3dB et la valeur maximale dans la direction  $\theta_0$ . La détermination des coefficients  $Z_1(f)$  et  $Z_2(f)$  revient à la résolution d'un système de deux équations à deux inconnues, à toutes les fréquences. Enfin, les espacements entre les microphones de la première et de la seconde antenne sont choisis de façon à respecter le critère de Shannon respectivement à la fréquence  $F$  et à la fréquence  $r * F$  : ils sont donc liés par une homothétie de rapport  $r$ . Sur la base d'un même nombre de capteurs pour chacune d'elles, il s'ensuit que les réponses des antennes 1 et 2 aux fréquences respectives  $F$  et  $rF$  sont identiques ; dans son principe, l'algorithme cherche à maintenir la directivité constante sur toute la bande par combinaison d'une antenne dont la réponse est médiocre en basse fréquence et d'une autre ne respectant plus le critère de Shannon en haute fréquence.

De façon similaire aux antennes imbriquées, on peut tirer profit du rapport d'homothétie entre les antennes pour limiter le nombre de capteurs nécessaires.

### 2.4 Méthode CDB (*Constant Directivity Beamforming*)

Cette méthode propose une antenne dont la longueur s'adapte automatiquement à la fréquence analysée [4]. Si le coefficient de pondération d'un microphone de position  $z_n$  sur l'axe de l'antenne à la fréquence  $f$  est de la forme :

$$W_n(f, \theta_0) = f A(z_n f) e^{2j\pi f z_n \sin \theta_0 / c} \quad (6)$$

la réponse spatiale de l'antenne sera invariante en fréquence.  $A(\cdot)$  est une fonction nommée BS (*Beam Shaping*) caractérisant la forme de la réponse fréquentielle de l'antenne ; en pratique, les fonctions BS peuvent être obtenues à partir de n'importe quel filtre RIF passe-bas standard de fréquence de coupure  $f_c = \frac{Qc}{2|z|}$  où  $Q$  représente l'ouverture de l'antenne (exprimée en nombre de longueurs d'onde), et  $c$  la célérité du son.

Pour optimiser le nombre de microphones nécessaires, il est judicieux d'utiliser une antenne à espacement logarithmique. Cependant, certaines pondérations classiques comme celle de Tchebyshev sont difficilement applicables à ces géométries d'antenne.

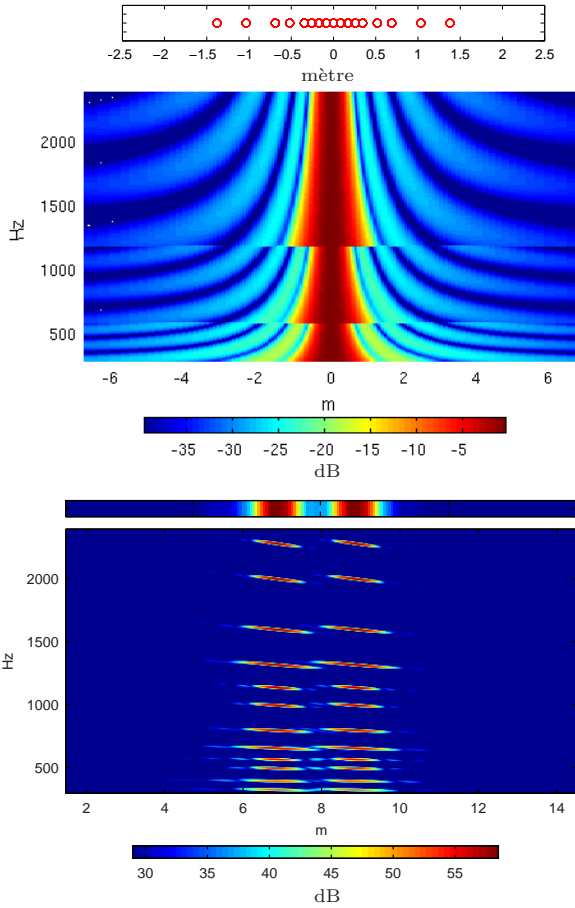


FIG. 1 – Méthode Antennes Imbriquées

### 3 Traitement d'antenne en champ proche : focalisation

Le traitement en champ proche présenté ici dérive de la formation de voies classique. Il peut être adapté de façon similaire aux diverses méthodes à directivité constante. Dans notre application en champ proche, on focalise l'antenne au point focal  $F$  en compensant les différences de temps de propagation  $\tau_{nF}$  du point focal  $F$  aux  $n$  différents capteurs; on compense par ailleurs les variations d'atténuation sur les différentes voies, liées aux distances  $d_{nF}$  entre point focal et capteur  $n$  [7] :

$$S(t, F) = \sum_{n=-N}^N \frac{d_{nF}}{d_{ref}} w_n x_n(t + \tau_{nF} - \tau_{ref}) \quad (7)$$

$w_n$  est un coefficient de pondération. L'expression (7) réalise en quelque sorte un filtrage spatial inverse adapté à une source située au point focal, relativement à un point de référence. En revanche la localisation n'est plus optimale au sens du maximum de vraisemblance, contrairement à la formation de voies classique.

### 4 Application en champ proche

On considère deux sources identiques, séparées de 2 mètres, se déplaçant à 60 km/h, sur une ligne parallèle à l'axe d'une antenne linéaire à 2.5 mètres de distance

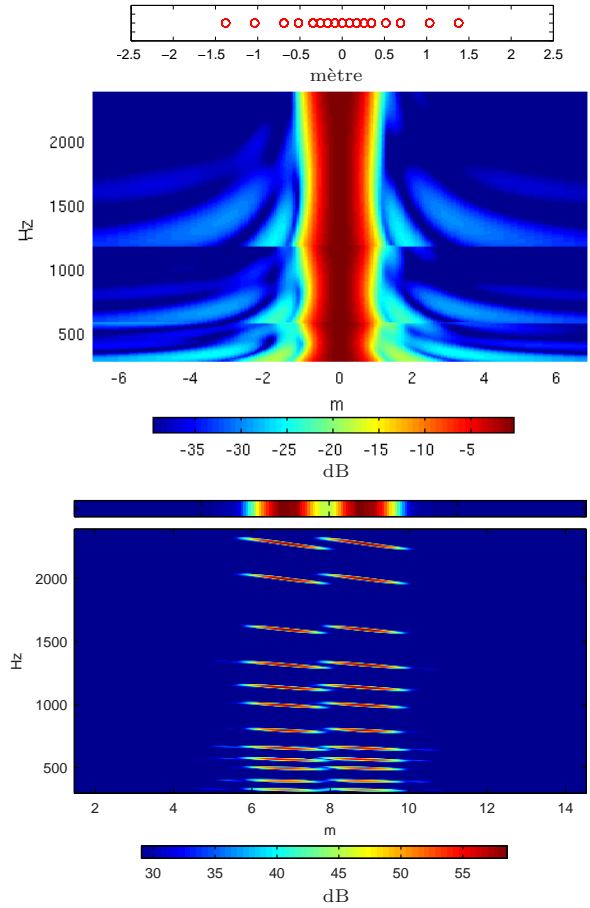


FIG. 2 – Méthode Multi-Faisceaux

(champ proche). Elles consistent en un spectre de raies compris entre 300 et 2400 Hz. Nous limitons le nombre de microphones de l'antenne à 17; pour des raisons d'adaptation de la méthode à la gamme de fréquence analysée, seule l'antenne CSA possède 19 microphones. Les signaux sont analysés avec les méthodes présentées au §2, adaptées au champ proche (§3). Les sous-antennes imbriquées, multi-faisceaux et CSA sont pondérées par des coefficients de Tchebyshev, fixant un niveau de lobes secondaires maximal à -25 dB. Les signaux sont démodulés [7].

Le tableau 1 et les figures 1 à 4 illustrent le comportement des méthodes. Chaque figure présente successivement la géométrie de l'antenne, la réponse théorique et la simulation pour les deux sources mobiles. Du point de vue de l'uniformité du lobe principal (écart entre les largeurs à 3dB max. et min.), les méthodes CSA et CDB se distinguent par des valeurs faibles sur toute la gamme de fréquence (Tab. 1). La méthode multi-faisceaux est peu performante pour ce critère (évasement du lobe principal aux extrémités de chaque octave). En revanche, ses lobes secondaires sont très bas : la sommation des réponses de l'antenne à des angles très proches crée des interférences destructives autour du lobe principal. On observe également des niveaux de lobes secondaires inférieurs à -19dB et stables pour les antennes imbriquées. Ceux de la méthode CSA sont relativement faibles, mais moins réguliers sur la gamme de fréquence. Sans pondération, la méthode CDB a des lobes secondaires proches de -13dB. Cependant elle

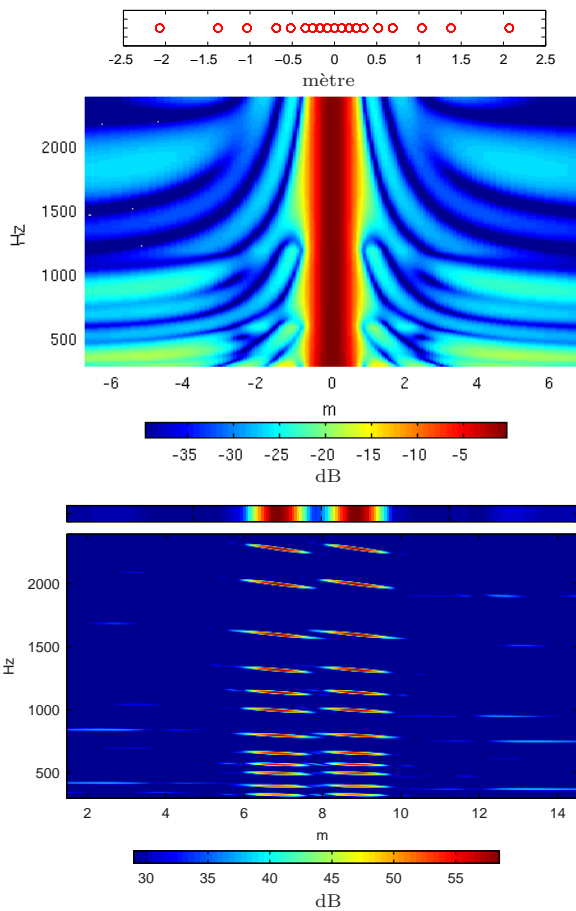


FIG. 3 – Méthode CSA

TAB. 1 – Performances des méthodes

	Imb	Mul-Fai	CSA	CDB
lobe secondaire max (dB)	-19.1	-19.4	-15.7	-12.5
largeur -3dB max (m)	1.04	1.11	0.72	0.57
uniformité (m)	0.47	0.34	0.09	0.07

présente une très bonne résolution (faible largeur à -3dB). De plus, on a pu constater que pour un même niveau des lobes secondaires pour toutes les méthodes, la méthode CDB conservait encore la meilleure résolution. L'antenne CSA se distingue également par sa sélectivité. Les résultats de la simulation confirment les observations effectuées sur les réponses d'antennes. On remarque également qu'un effet doppler cumulé à des lobes secondaires élevés peut provoquer des artefacts importants sur toute la gamme de fréquence. Malgré l'instabilité de ses lobes secondaires, la méthode CSA apparaît comme un bon compromis entre uniformité du lobe principal, résolution et niveau des lobes secondaires.

## 5 Conclusion

Plusieurs méthodes à directivité constante, adaptées ici au contexte de localisation de sources sonores mobiles en champ proche ont été comparées selon les critères d'uniformité du lobe principal, résolution spatiale et niveau des lobes secondaires ; elles constituent une réelle alternative

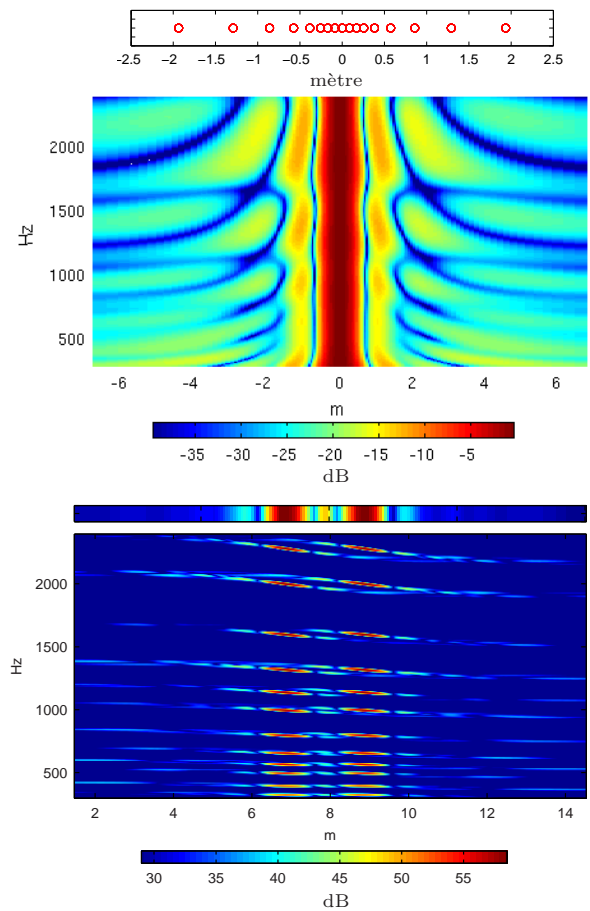


FIG. 4 – Méthode CDB

simple à la méthode classique des antennes imbriquées. Récemment, d'autres alternatives plus complexes, basées sur l'analyse modale, ont été proposées. Cependant, leur robustesse doit encore être démontrée.

## Références

- [1] R.P. Smith, Constant beamwidth receiving arrays for broad band sonar systems, *Acustica* **23**, 21-26, 1970.
- [2] J. Lardies, J.-P. Guilhot, A very wide bandwidth constant beamwidth acoustical end-fire line array without side lobes, *Journal of Sound and Vibration* **120**(3), 557-566, 1988.
- [3] F. Bongard, Microphone array for soloists, CFA/DAGA '04, Strasbourg, France, 2004.
- [4] M. Brandstein, D.B. Ward, Microphone arrays, *Springer-Verlag*, Digital Signal Processing, 2001.
- [5] M.M. Goodwin, G.W. Elko, Constant beamwidth beamforming, ICASSP-93, pp.169-182, 1993.
- [6] Z. Wang, J. Li P. Stoica, T. Nishida, M. Sheplak, Constant beamwidth and constant-powerwidth wide-band robust Capon beamformers for acoustic imaging, *J. Acoust. Soc. Am.* **116**(3), 1621-1631, 2004.
- [7] M.A. Pallas, Localisation des sources de bruit des transports guidés - les antennes microphoniques, *Instrumentation Mesure Métrologie (I2M)* **1-2**, 9-36, 2002.